

А.В. РУДНЕВ, науч. сотрудник, НТУ «ХПИ»;
М.Д. УЗУНЯН, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Представлено результати дослідження якості поверхні пластин, оброблених методом алмазно-іскрового шліфування. Показано, що по отриманих залежностях можна визначити якість обробленої поверхні або по необхідній шорсткості визначити режими обробки, що гарантують отримання цієї якості.

Представлены результаты исследования качества поверхности пластин, обработанных методом алмазно-искрового шлифования. Показано, что по полученным зависимостям можно определить качество обработанной поверхности или по необходимой шероховатости определить режимы обработки, которые гарантируют получения этого качества.

The results of research of quality control in high technology of grinding process are presented. The received calculated data permit to prognosticate the surface quality or determine the necessary conditions of cutting process in accordance with demand quality.

Прогностические расчеты микрогеометрии обработанной поверхности

Микрогеометрическое качество поверхности зависит от многих факторов, характеризующих условия обработки. При шлифовании наиболее значимыми принято считать зернистость и концентрацию круга, глубину резания, скорость обработки и продольную подачу. Обычно, проводя исследования с варьированием входных факторов и, имея общие уравнения, описывающие поведение системы, находят ее выходные параметры и определяют условия, при которых они могут быть оптимальными. Это идеальная прямая задача, которую можно моделировать.

Обратная задача, когда по требуемым конкретным выходным параметрам необходимо определить условия, обеспечивающие эти параметры, является более сложной. Эти задачи относятся к классу задач управления.

В технологии обработки шлифованием такие задачи могут быть сформулированы следующим образом – по заданной шероховатости поверхности или необходимой производительности установить параметры процесса, определяющие условия обработки.

Теоретико-экспериментальные основания предлагаемого расчетного подхода

Для того, чтобы оценить потенциальную шероховатость поверхности, необходимо знать разновысотность алмазных зерен на поверхности круга,

которая будет отражена на обработанной поверхности в виде огибающей суммарных наложений режущих профилей круга в направлении вектора скорости резания. Эта огибающая является совокупной характеристикой режущей поверхности круга. Назовем ее суммарный приведенный профиль круга. Характеристика суммарного приведенного профиля зависит от зернистости и концентрации круга.

При каждом обороте и перемещении вдоль направления продольной подачи ($S_{\text{прод}}$) приведенный профиль оставляет на обработанной поверхности определенный соответствующий след. Количественные значения шероховатости поверхности будут получены в результате n соприкосновений перемещающегося приведенного профиля с обрабатываемой поверхностью, где n определяется частотой вращения круга ω , об/мин, скоростью продольной подачи $S_{\text{прод}}$, мм/мин и шириной рабочей поверхности круга b , мм:

$$n = \frac{b \cdot \omega}{S}.$$

Чтобы иметь представление о возможных значениях числа встреч n суммарного профиля, которые затем могут быть использованы в расчетах микронеровностей обработанной поверхности, приведем эти значения для некоторых исходных данных: при $b=10\text{мм}$, $\omega=6000\text{об/мин}$ и $S=200\text{мм/мин}$ будем иметь $n=300$ при одном проходе; при $b=10\text{мм}$, $\omega=2000\text{об/мин}$ и $S=1000\text{мм/мин}$ – $n=20$ при одном проходе, $n=40$ при двух проходах и т.д.

При одном обороте круга оставляемый на обрабатываемой поверхности след есть результат наложений всех профилей зерен в различных сечениях круга, перпендикулярных вектору скорости резания. Неровности этого следа являются как бы отпечатком суммарного приведенного профиля круга. Наиболее удобно их характеризовать средним квадратичным отклонением σ_1 профиля.

Очевидно, что стандартное отклонение суммарного профиля σ_1 и стандартное отклонение микронеровностей обработанной поверхности σ_2 имеют тесную связь, то задачу управления системой для получения заданной шероховатости можно реализовать.

Задавшись стандартным отклонением суммарного профиля режущей поверхности круга σ_1 , которое определяется экспериментально для различных условий, можно вычислить σ_2 , характеризующее шероховатость обработанной поверхности.

Расчеты показывают, что среднее квадратичное отклонение приведенного профиля является важнейшей характеристикой, предопределяющей шероховатость обработанной поверхности.

Отношение стандартного отклонения σ_2 микронеровностей поверхности к стандартному отклонению σ_1 суммарного приведенного профиля, есть величина постоянная для любых значений σ_1 , и зависит только от числа контактов n . В связи с этим представляется возможным протабулировать это отношение для любых значений n . Имея табличные значения отношения $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, можно для любого значения σ_1 , суммарного приведенного профиля найти потенциальную шероховатость поверхности.

Были рассчитаны значения, $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, $\frac{R_a}{\sigma_1}$ $R_a = 0,80 \cdot \sigma_2$ для n находящегося в диапазоне от 20 до 300. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета шероховатости $\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \frac{R_a}{\sigma_1} \right)$ и положения

средней линии профиля $\frac{m_2}{\sigma_1}$

n	$\frac{m_2}{\sigma_1}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	$\frac{R_a}{\sigma_1}$	n	$\frac{m_2}{\sigma_1}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	$\frac{R_a}{\sigma_1}$
20	1,867	0,525	0,419	160	2,671	0,41	0,327
30	2,043	0,496	0,396	170	2,692	0,407	0,325
40	2,161	0,477	0,381	180	2,711	0,405	0,323
50	2,249	0,464	0,37	190	2,729	0,403	0,322
60	2,319	0,455	0,363	200	2,746	0,401	0,32
70	2,377	0,447	0,356	210	2,762	0,4	0,319
80	2,427	0,44	0,351	220	2,777	0,398	0,317
90	2,47	0,433	0,346	230	2,792	0,396	0,316
100	2,508	0,428	0,341	240	2,806	0,395	0,315
110	2,541	0,42	0,335	250	2,819	0,393	0,313
120	2,572	0,421	0,336	260	2,832	0,391	0,312
130	2,6	0,418	0,334	270	2,844	0,39	0,311
140	2,626	0,415	0,331	280	2,856	0,389	0,31
150	2,649	0,412	0,329	290	2,867	0,388	0,31
				300	2,878	0,387	0,308

Анализ таблицы 1 показывает, что с увеличением n высота микронеровностей (σ_2 или R_a) уменьшается, а математическое ожидание m_2 увеличивается.

Полученные результаты позволяют решать задачи управления - по заданной шероховатости поверхности (σ_2 , R_a) легко рассчитывается необходимые σ_1 для различных n , а затем выбираются соответствующие условия шлифования. Ранее [1] были проведены специальные экспериментальные исследования по установлению значений σ_1 для различных зернистостей алмазного круга и глубин шлифования.

Были получены следующие результаты: для твердого сплава Т15К6 $\sigma_1 = 0,023t^{0,623}z^{0,56}$, для безвольфрамового твердого сплава ТН20 $\sigma_1 = 0,018t^{0,587}z^{0,62}$ (z - средняя величина зернистости в мкм, t - глубина шлифования в мкм).

Поскольку, с нашей точки зрения, концентрация также в немалой степени влияет на величину σ_1 , особенно при обработке сверхтвердых материалов, нами были проведены дополнительные исследования. Обрабатывались мелкозернистые алмазно-твердосплавные пластины (АТПМ) кругами зернистостью 50/40, 100/80 и 160/125 и концентрацией 2, 4, 6 при глубинах шлифования 0,005 мм, 0,008 мм и 0,011 мм. Затем с помощью профилографирования оценивалась величина σ_1 и была установлена зависимость стандартного отклонения суммарного профиля от зернистости, концентрации алмазов круга и глубины шлифования для пластин АТПМ:

$$\sigma_1 = 3,112 \cdot z^{1,477} \cdot k^{-0,93} \cdot t^{0,881}$$

Таким образом, имея необходимое значение σ_1 для любой требуемой шероховатости для различного числа контактов n , можно рассчитать необходимую зернистость и концентрацию круга, а также величину поперечной подачи.

Требуемая шероховатость может быть обеспечена при различных значениях совокупного фактора σ_1 и соответствующих ему зернистости и концентрации круга, при этом естественно различным σ_1 соответствуют различные числа контактов n круга (суммарного профиля) с материалом за время прохождения расстояния, равного ширине круга.

В качестве примера использования данных таблицы рассмотрим зависимость шероховатости R_a от числа контактов для различных фиксированных значений σ_1 ; на рис. 1 представлены эти зависимости для различных значений σ_1 в диапазоне от 0,35 до 0,1 мкм.

Следует иметь в виду, что одно и тоже значение другого совокупного фактора n может быть получено при различных сочетаниях скоростей резания и продольной подачи; при этом шероховатость поверхности практически не

изменяется, что подтверждается экспериментами; появляется возможность графического представления номограмм с линиями равной шероховатости и построения большого количества пространственно-временных зависимостей.

Таким образом, при установленном положении о постоянстве отношения стандартных отклонений микронеровностей поверхности и суммарного профиля круга $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ для любых условий шлифования можно прогнозировать потенциальную шероховатость, либо по заданной шероховатости управлять условиями обработки (рис. 2), что представляется важным при проектировании процессов высоких технологий.

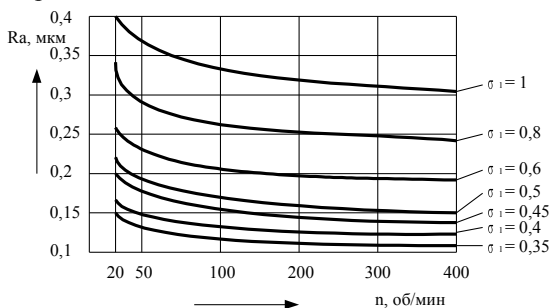


Рисунок 1 – Зависимость шероховатости поверхности от числа контактов для различных значений σ_1 суммарных профилей.

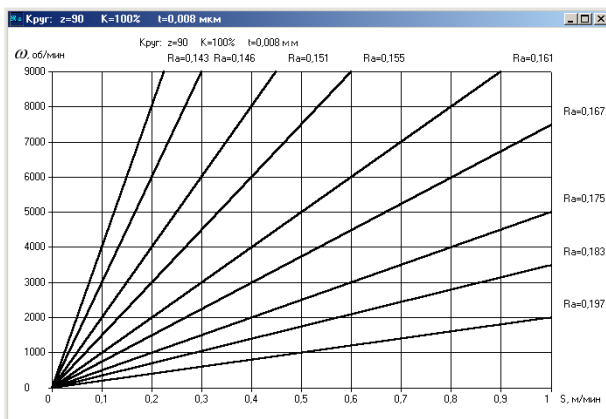


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости от условий обработки

Примеры экспериментальных проверок прогностических расчетов шероховатости обработанной поверхности

Исследования по определению шероховатости поверхности и среднего квадратического отклонения приведенного суммарного профиля σ_1 для пластин АТПМ были проведены при различных режимах обработки.

Проводилось две серии экспериментов: по определению среднего квадратического отклонения приведенного суммарного профиля σ_1 при различных режимах обработки и по определению шероховатости поверхности при тех же режимах.

В первой серии экспериментов определялось среднее квадратическое отклонения приведенного суммарного приведенного профиля круга σ_1 при обработке пластин АТПМ при различных режимах обработки. Затем вычисляли значения числа встреч n для каждой скорости резания.

Зная величины числа встреч n , находим методом интерполяции значения R_{σ} . Затем по значению R_{σ} , из соотношения $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = R_{\sigma}$ находим σ_2 и прогнозируемую величину Ra_2 .

Для проверки правильности расчетов были проведены контрольные испытания. Пластины шлифовались на тех же режимах и затем измерялась шероховатость. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные значения шероховатости (АТПМ)

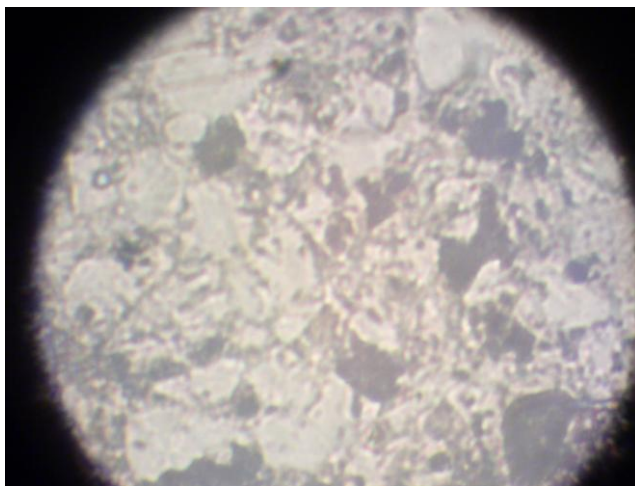
№ п/п	$V_{кр}$, м/с	$S_{поп}$, мм/дв.х	Z , мкм	K , %	Ra_2 , мкм	Ra , мкм	Δ , %
1	35	0,011	142,5	150	0,3805	0,570	33,25
2	15	0,011	142,5	150	0,2674	0,400	33,15
3	35	0,005	142,5	150	0,2991	0,330	9,35
4	15	0,005	142,5	150	0,3398	0,427	20,37
5	35	0,011	45	150	0,1307	0,198	34,00
6	15	0,011	45	150	0,1447	0,220	34,22
7	35	0,005	45	150	0,1336	0,197	32,19
8	15	0,005	45	150	0,1762	0,267	34,02
9	35	0,011	142,5	50	0,2701	0,280	3,54
10	15	0,011	142,5	50	0,1604	0,227	29,22
11	35	0,005	142,5	50	0,1859	0,207	10,06
12	15	0,005	142,5	50	0,1479	0,227	34,77
13	35	0,011	45	50	0,1046	0,155	32,55
14	15	0,011	45	50	0,1227	0,147	16,35
15	35	0,005	45	50	0,1365	0,200	31,75
16	15	0,005	45	50	0,1384	0,133	3,82
17	35	0,008	90	100	0,1743	0,240	27,40
18	15	0,008	90	100	0,1573	0,230	31,61
19	25	0,011	90	100	0,1755	0,265	33,76
20	25	0,005	90	100	0,2119	0,220	3,70
21	25	0,008	142,5	100	0,1755	0,260	32,48
22	25	0,008	45	100	0,1301	0,190	31,50
23	25	0,008	90	150	0,1483	0,173	14,44
24	25	0,008	90	50	0,1150	0,167	30,99

Обработка результатов экспериментов на ЭВМ позволила установить зависимость шероховатости шлифованных поверхностей пластин АТПМ от параметров обработки.

Для АТПМ получено следующее уравнение регрессии:

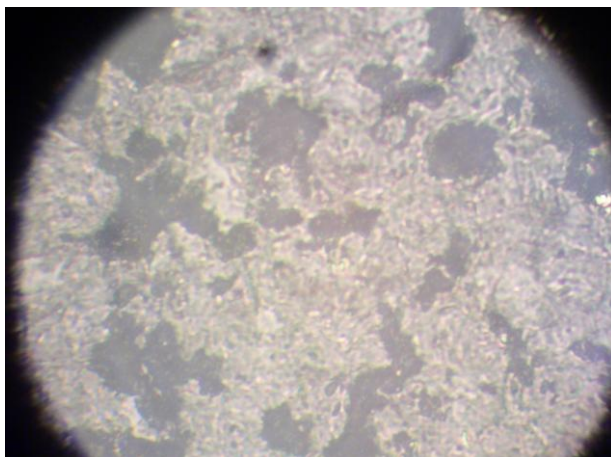
$$\begin{aligned} Ra = & 0,230 + 0,009 \cdot V + 0,017 \cdot S_{\text{поп}} + 0,058 \cdot z + 0,060 \cdot k + 0,034 \cdot V^2 + \\ & + 0,020 \cdot S_{\text{поп}}^2 + 0,050 \cdot z^2 - 0,060 \cdot k^2 + 0,028 \cdot V \cdot S_{\text{поп}} + 0,001 \cdot V \cdot z - \\ & - 0,011 \cdot V \cdot k + 0,022 \cdot S_{\text{поп}} \cdot z + 0,000 \cdot S_{\text{поп}} \cdot k + 0,031 \cdot z \cdot k \end{aligned}$$

Экспериментальные значения шероховатости алмазного слоя (режущего в будущем лезвийном инструменте) отличаются от расчетных. Разброс отклонений составляет от 3,54 до 34,77%. Выяснить причину такого расхождения позволили исследования обработанной поверхности режущей части пластин АТПМ с помощью микроскопа МИМ-11. На изображениях поверхности, полученных при 256-кратном увеличении, видны «кратеры» - неглубокие (не более 30-40 мкм) вырывы обрабатываемого материала различной площади (рис. 3 – 4). Объяснение появления этих «кратеров» можно найти в работе В.А.Федоровича [2]. Для того, чтобы снять слой обрабатываемого алмаза, зерна круга должны несколько раз ударить по обрабатываемому материалу для появления и роста трещины, которая и приводит к сколу частиц обрабатываемого алмаза. Происходят сколы части зерна либо нескольких зерен, обрабатываемого материала одновременно, которые мы и видим на фотографиях.



Условия шлифования: $V = 15$ м/с, $S_{\text{поп}} = 0,005$ мм/дв.ход, круг $z = 160/125$, $k = 150\%$

Рисунок 3 – Поверхность алмазного слоя пластины АТПМ.



Условия шлифования: $V = 35$ м/с, $S_{\text{поп}} = 0,011$ мм/дв.ход, круг $z=160/125$, $k=150\%$
 Рисунок 4 – Поверхность алмазного слоя пластины АТПМ.

Обзор основных положений и результатов проверки предложенного теоретико-экспериментального подхода

Использование положения о постоянстве отношения среднеквадратических отклонений микронеровностей поверхности и приведенного суммарного профиля круга σ_2/σ_1 при проектировании процессов высоких технологий является весьма перспективным, так как позволяет с высокой точностью спрогнозировать потенциальную шероховатость поверхности, либо по заданной шероховатости определить необходимые параметры круга и режимов резания, что доказано экспериментально.

Выявлены причины расхождения расчетных и экспериментальных значений шероховатости обработанных пластин АТПМ. Основной причиной является вырыв зерен обрабатываемого материала при шлифовании.

Установлено, что доводка шлифованных пластин АТПМ, которая проводилась в процессе исследований, позволяет повысить качество поверхности до $Ra = 0,02 - 0,06$ мкм или $Ra = 20 - 60$ нм, что даст возможность применять этот инструментальный материал в условиях нанотехнологий.

Список литературы: 1. Узунян М.Д., Глухов А.Б. Исследование корреляционной функции ординат приведенного профиля алмазного круга // Резание и инструмент. – 1998. – Вып. 52. – С. 243 - 250. 2. Федорович В.А. Алмазное шлифование сверхтвердых материалов с управлением режущим рельефом круга: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1981. – 219 с.

Надійшла до редколегії 15.07.2010